

## 地震時の地盤の流動メカニズムと流動量の定量的評価

|     |   |
|-----|---|
| 著者  | 山口 晶, 奥平 喜広, 佐藤 由惟, 吉田 望, 飛田 善雄   |
| 雑誌名 | 東北学院大学工学部研究報告   |
| 巻   | 42  |
| 号   | 1・2   |
| ページ | 35-40   |
| 発行年 | 2008-03   |
| URL | <a href="http://id.nii.ac.jp/1204/00024566/">http://id.nii.ac.jp/1204/00024566/</a> |

## 地震時の地盤の流動メカニズムと流動量の定量的評価

### Mechanism of Ground Flow During Earthquake and Estimation of Ground displacement

山口 晶, 奥平喜広, 佐藤由惟, 吉田望, 飛田善雄

Akira YAMAGUCHI, Yoshihiro OKUDAIRA, Yui SATO, Nozomu YOSHIDA and Yoshio TOBITA

#### Abstract

We conducted stress and strain controlled undrained cyclic shear tests. The factor which affects the ground displacement due to liquefaction is studied. We focused the effective stress path.

We showed that the increase of strain is able to be estimated from the factor which is obtained from the effective stress path. From the results, we calculated the ground displacement and the effective stress path. The calculation result corresponded with the result from experiments.

#### 1. はじめに

土木構造物の設計における課題は、性能設計を行う上で、地震時の被害量を定量的に予測することである。地盤工学の分野では、特に液状化による地盤の流動が構造物に与える影響が大きいため、流動量を定量的に求める必要がある。しかし、地震動のようなランダムな応力履歴が液状化した地盤の流動量に与える影響は明らかになっておらず、従って流動量の定量的評価は難しいのが現状である。

本研究では、まず、著者らがこれまでに行なってきた実験から、有効応力経路上で流動量に影響を与える因子を考察する。次に、本研究で行った要素試験による実験結果から、これらの因子と流動量の関係について確認を行う。これらの結果に基づいて、土の骨格構造と液状化時に発生する流動量の関係を推察し、応力履歴により構造が乱れて流動が発生する過程を考察する。その考察に基づいて、流動量を予測する手法を考案し、その考察が実現現象を表現できることを確認する。

#### 2. 応力経路と構造の乱れの関係

著者らはこれまでに、初期せん断応力を載荷した供試体に対して繰返しせん断応力を与えて過剰間隙水圧比を所定の値まで上昇させ、初期せん断力を与えたままで間隙水を注入する実験を行っている<sup>1)</sup>。Fig.1にその実験の有効応力経路を示す。これは、過剰間隙水圧比を0.6まで上昇させた実験である。また、Fig.2に同実験の間隙水の注入量に対応する体積ひずみと、それに伴って発生したせん断ひずみの関係を示す。粒子構造が強固であれば間隙水の注入に対してせん断ひずみの発生量が小さくなり、粒子構造が弱ければ間隙水の注入に対してせん断ひずみの発生量が増加すると推察できる。従って、この曲線の傾きは骨格構造の強さに対応していると考えられる。図のように応力履歴によって、骨格構造の劣化の程度が異なることがわかる。

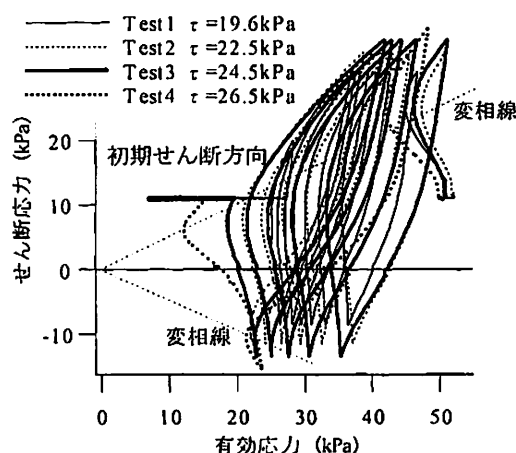


Fig.1 間隙水注入実験を行った実験の有効応力経路<sup>1)</sup>

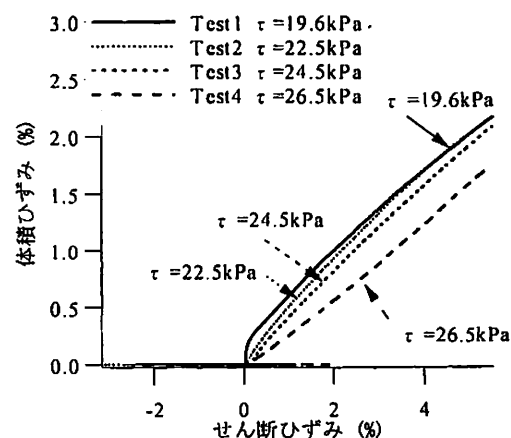


Fig.2 間隙水注入実験を行った実験の体積ひずみせん断ひずみ関係<sup>1)</sup>

Fig.3にせん断応力振幅とFig.2の曲線の傾き(体積ひずみ/せん断ひずみ, 以降、ダイレイタンスー関係と呼ぶ)の関係を示した。なお、「 $Dr=80\%$ ,  $ppr=0.6$ 」とは、相対密度約80%

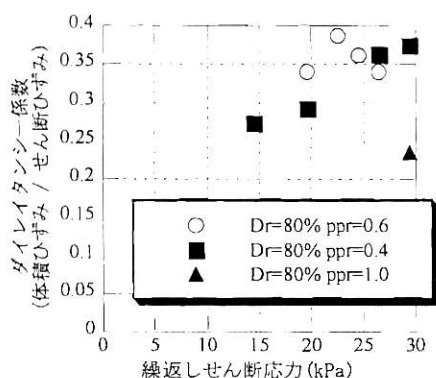


Fig.3 グレイタンシーと繰返しせん断応力の関係

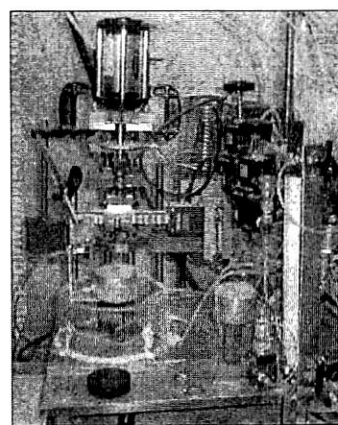


Fig.4 簡易型単純せん断試験機

Table 1 実験条件

| 実験名           | s127        | s137 | s137-2 | s147 | inil           | rPI  | rOD  | rOF  | sc5          | sc7 |
|---------------|-------------|------|--------|------|----------------|------|------|------|--------------|-----|
| 相対密度 (%)      | 43          | 53   | 63     | 66   | 56             | 66   | 66   | 61   | 61           | 57  |
| 繰返しせん断応力(kPa) | 12.7        | 13.7 | 13.7   | 14.7 | 39             | ---  | ---  | ---  | ---          | --- |
| 初期せん断応力 (kPa) | ---         | ---  | ---    | ---  | 19.5           | ---  | ---  | ---  | ---          | --- |
| 最大せん断応力(kPa)  | ---         | ---  | ---    | ---  | ---            | 18.9 | 18.9 | 18.9 | ---          | --- |
| せん断ひずみ振幅 (%)  | ---         | ---  | ---    | ---  | ---            | ---  | ---  | ---  | 5%           | 7%  |
| せん断履歴         | 応力制御<br>規則波 |      |        |      | ひずみ制御<br>ランダム波 |      |      |      | ひずみ制御<br>規則波 |     |

の供試体に対して過剰間隙水圧比 0.6 になるまで繰返しせん断履歴を与えた実験であり、Test1～Test4がこれである。Fig.3を見ると、初期せん断応力の方向と反対の変相線と交わっていない応力振幅 19.6kPa と 22.5kPa の実験は、応力振幅の増加に伴ってグレイタンシー関係が増加している。それに対して、変相線と交わっているせん断応力振幅の大きい実験では、応力振幅の増加に伴ってグレイタンシー関係が減少している。同図上に  $Dr=80\%$ 、 $ppr=0.4$  および  $ppr=1.0$  の実験を合わせて示した。 $Dr=80\%$ 、 $ppr=0.4$  の実験は全て有効応力経路が変相線に交わる前に繰返しせん断応力が停止されている。この実験では、せん断応力振幅の増加に伴ってグレイタンシー関係が増加している。つまり、初期せん断応力の方向と反対の応力方向の変相線と交わると繰返しせん断応力振幅の増加に応じてグレイタンシー関係が減少する。また、変相線と交わらない場合は、繰返しせん断応力振幅の増加に応じてグレイタンシー関係が増加する。このグレイタンシー関係が骨格構造の強さに対応していると考え、有効応力経路が初期せん断応力と反対方向の変相線と交わると構造が弱くなり、交わらないと構造が強くなる、またその構造の劣化の程度は応力振幅の大きさに対応している、と考えることができる。

### 3. 実験

本研究で使用する試験機は、Fig.4に示す簡易型単純せん断試験機である<sup>2)</sup>。等方圧分の拘束圧は負圧で与え、垂直圧はペロフラムシリンダーにより供試体上部表面に載荷することで与える。せん断応力・変位は、ステッピングモーターの回転により、供試体上部ペダスタルヘロッドを介して供試体と与えている。この試験機は応力制御とひずみ制御の両方の条

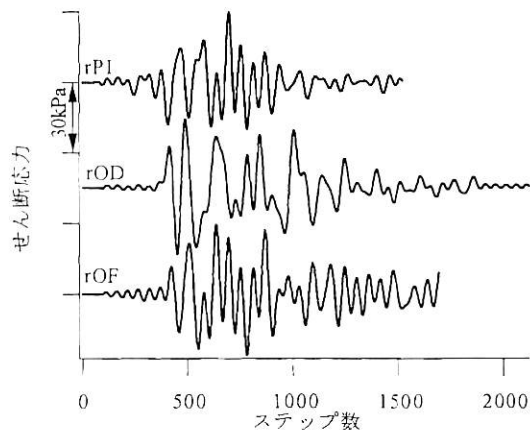


Fig.5 入力波として用いたランダム波せん断応力履歴

件で実験が可能である。ただし、応力の載荷速度とひずみ速度は厳密には制御できない。

使用した試料は豊浦砂である。乾燥落下法で砂を堆積させた後、二重負圧法により飽和させた。次に拘束圧を負圧で等方に 49kPa 与えた。せん断時は排水バルブを閉じると共に、上下方向の変位も拘束した。Table 1 に実験条件を示す。全ての供試体で、相対密度 60% を目標とした。載荷した応力履歴は、規則波とランダム波である。Fig.5 に応力制御ランダム波形を示す。また、推定した流動メカニズムから定量的に流動量が推定できるかを確認する目的で、ひずみ制御試験も行った。

### 4. 実験結果

本研究で考察する液状化時の地盤の流動とは、非排水時に有効応力がほぼゼロの状態が発生する変位量である。Fig.6 に

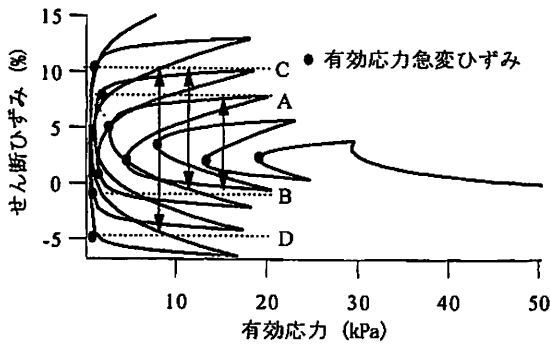


Fig.6 せん断ひずみ-有効応力関係

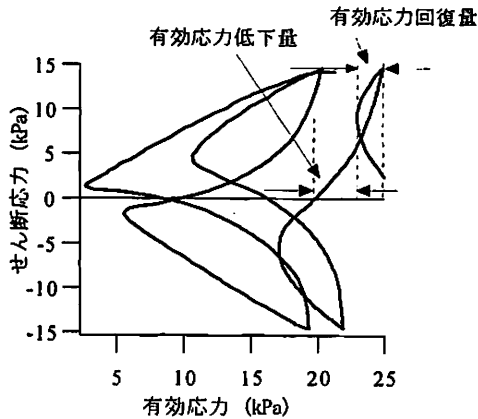


Fig.8 有効応力経路における有効応力低下量と有効応力回復量の定義

本研究で行った実験のs137-2のせん断ひずみ-有効応力関係を示す。図中に有効応力が急変するひずみを黒丸で、本研究で定義した流動量を実線矢印で示した。あるサイクルで有効応力が低下し、せん断抵抗がほぼゼロで発生する変位が始まる(A)。この変位は有効応力の回復によって停止し、有効応力が回復した後、再び低下して、新たにせん断抵抗がほぼゼロで発生する変位が始まる(B)。これを繰り返す(C, D)ことによって、有効応力が急変するひずみが増大していく。このように、流動が開始するひずみの位置を調べることによって、流動量が推定できる可能性があると言える。そこで、本研究ではこの有効応力急変ひずみがあるサイクルから次のサイクルまでに移動する量(AB間, BC間, CD間のひずみ量)を流動量と考えた。なお、厳密に考えれば、流動量は有効応力がほぼゼロの間に発生するひずみ量であり、この流動量が上記で考えた有効応力急変ひずみの間隔と一致しない可能性がある。そこで、有効応力-せん断ひずみ関係のグラフにおいて、有効応力の極小値から有効応力が $\pm 0.098 \text{ kPa}$ だけ変化した範囲で発生するひずみ量を真の流動量にきわめて近い値と考え、比較を試みた。Fig.7に有効応力の極小値から $\pm 0.098 \text{ kPa}$ の範囲のひずみ量とそれに対応するサイクルの有効応力急変ひずみの移動量との比較を示す。ただし、このときのデータは有効応力がほぼゼロに達していない場合も考慮されている。有効応力急変ひずみは有効応力がゼロに達していなくても観察されているため、あえて同図上に示した。両軸の大きい部分

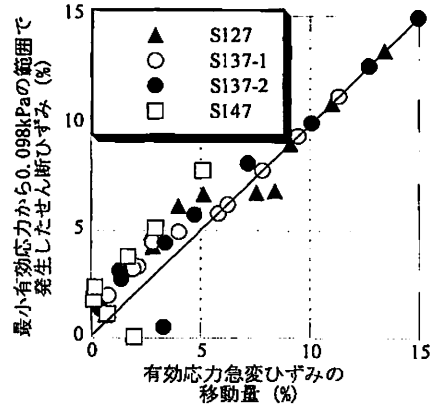


Fig.7 最小有効応力から定義した流動量と有効応力急変ひずみから定義した流動量の比較

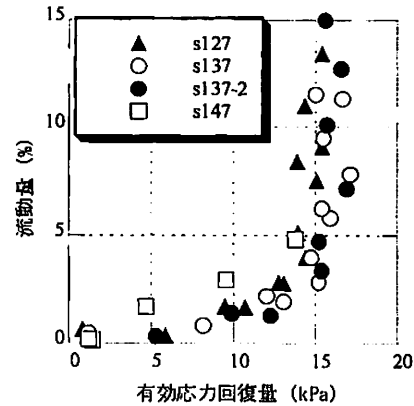


Fig.9 流動量と有効応力回復量の関係

が有効応力の低下が大きい部分に相当する。特に両軸の大きい部分で図のようにほぼ一致していることから、有効応力の急変ひずみの移動量は、有効応力がほぼゼロで発生する流動量と同様と考えてよいといえる。これ以降は、有効応力急変ひずみの移動量を流動量とする。

2章で述べたように、有効応力経路上で変相線と交わることによって土の骨格構造が変化することが既に示されている。従って、本研究で定義した流動量も、有効応力経路の影響を受けることが推察できる。そこで、有効応力経路における有効応力回復量と流動量に着目し、流動量を検討することとした。

Fig.8に本研究で定義した有効応力低下量と回復量の図を示す。有効応力回復量とは、ある半サイクルにおいて、変相線に交わってから回復した有効応力量と定義した。有効応力低下量は、有効応力が回復し始める値からせん断応力のゼロ線に交わるときの有効応力の差と定義した。ここで、それぞれの実験の半サイクルにおける有効応力回復量と流動量の関係をFig.9に示す。繰返しせん断応力の大きさに関わらず、有効応力の回復量に応じて流動量が増加している。流動量は、有効応力の回復量に応じて増加する傾向にあることが示された。

## 5. 想定した流動のメカニズム

既往の研究<sup>1)</sup>とこれまでの実験結果は次のようにまとめられる。

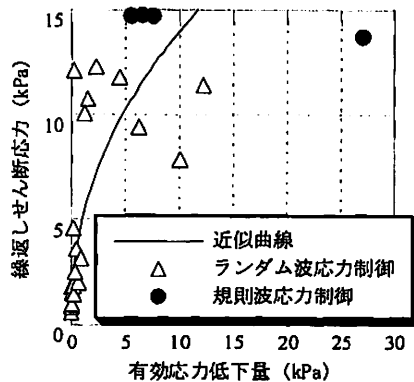


Fig.10 繰返しせん断応力と有効応力低下量

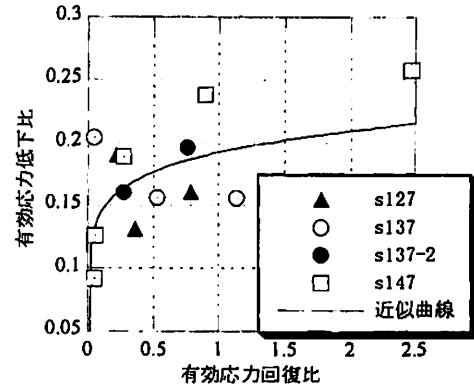


Fig.11 過剰間隙水圧比0.8以下の有効応力低下比と有効応力回復比

1) 有効応力経路上でせん断応力のプラス側のみあるいはマイナス側のみの変相線にしか交わらない場合、有効応力の低下量と流動量の増加は小さい。また、土の骨格構造が強くなる。

2) 有効応力経路上でせん断応力のプラス側とマイナス側の両方の変相線に交わる場合、有効応力の低下と流動量の増加は大きい。また、土の骨格構造が弱くなる。この場合、流動量は、有効応力回復量に応じて大きくなる。

以上のような実験結果を参考に、これらの現象を説明できる流動のメカニズムを以下のように想定した。

1) 有効応力経路が変相線と交わり、有効応力が回復することによって異方的な応力が発生し、砂粒子同士が押し付けられ、その有効応力回復量に応じた程度の異方性構造が形成される。

2) 形成された異方性構造は、形成された側と反対側のせん断応力の変相線に交わることによって有効応力が回復し、これまでと異なる方向の異方的圧力によって砂粒子が押し付けられ、これまでの砂の骨格構造が解消される。また、その際に有効応力の回復量に応じて新たに異方性構造が形成される。

3) 異方性構造の形成→解消→形成という過程において土の骨格構造が乱され、有効応力が低下するとともに有効応力が急変するひずみの移動量が增大する。

4) 有効応力の回復が応力経路においてプラス側あるいはマイナス側のみで、異方性構造の解消が行われない場合、片側方向にのみ異方性構造が発達する。従って、有効応力急変ひずみの増大と有効応力の低下が少ない。

## 6. 流動量予測手法

本章では、上記で想定した砂骨格が乱れて流動が発生するメカニズムが実現現象を説明できることを確認する。せん断応力と有効応力の低下量の関係や、流動量の関係を実験結果から近似式を求め、流動量を計算する予測手法を考案した。土の骨格構造の乱れは有効応力の低下を伴うことから、流動の発生を時間的に考察するためには応力履歴と有効応力の低下の関係も求める必要がある。そこで、応力制御規則波の実験と応力制御ランダム波の実験結果を整理し、繰返しせん断応力-有効応力低下量関係、有効応力回復量-有効応力低下量

関係、有効応力回復量-流動量関係を求め、近似式を求めた。

### 1) 繰返しせん断応力振幅と有効応力低下量の関係

Fig.10に有効応力経路が変相線に交わる前の繰返しせん断応力振幅と有効応力低下量の関係を示す。ここでは、ランダム波のデータを追加した。繰返しせん断応力が小さいときは、有効応力の低下が小さく、繰返しせん断応力が大きくなると有効応力の低下が大きくなる。ここで、繰返しせん断応力と有効応力の低下をモデル化するために、対数で近似した。この時、近似式は以下ようになる。

$$y = 5.02 \times x^{0.445} \quad R = 0.78 \cdots 1)$$

ここで  $x$  は有効応力低下量、 $y$  はせん断応力である。

### 2) 有効応力回復量と有効応力低下量の関係

ここでは、有効応力の回復量と低下量の関係を、有効応力回復比（有効応力回復量/有効応力が回復する直前の有効応力）と有効応力低下比（有効応力の低下量/有効応力が回復する直前の有効応力）の関係として求めることとする。ここでは、過剰間隙水圧比が0.8に達する前と後で分けて結果を整理した。その理由は、過剰間隙水圧比が大きくなると、物理的に有効応力の低下量が制限されるためであり、ここでは物理的に低下できなくなる影響があると思われる過剰間隙水圧比として便宜的に0.8の値を考えた。

Fig.11に過剰間隙水圧比が0.8に達する前の有効応力回復比と有効応力低下比の関係を示す。この図をみると、有効応力回復比に対応して有効応力低下比が増加している。対数で近似すると

$$y = 0.192 \times x^{0.123} \quad R = 0.57 \cdots 2)$$

となる。 $x$  は有効応力回復比、 $y$  は有効応力低下比である。

Fig.12に過剰間隙水圧比が0.8に達した後の有効応力回復比と有効応力低下比の関係を示す。図では、有効応力回復比の増加に伴って有効応力低下比が減少している。有効応力の低下量を比で考えた場合、過剰間隙水圧比が0.8以上になると、物理的に有効応力の低下が制限されるため、このような関係になったと考えられる。近似式は以下の通りである。

$$y = 0.195 - 0.0122x \quad R = 0.70 \cdots 3)$$

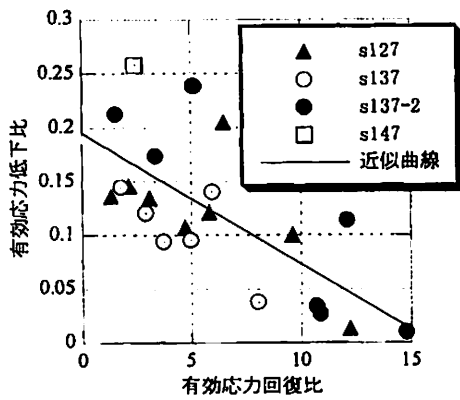


Fig.12 過剰間隙水圧比0.8以上の有効応力低下比と有効応力回復比

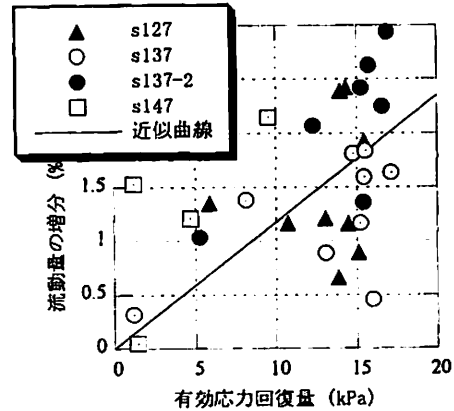


Fig.13 流動量の増分と有効応力回復量

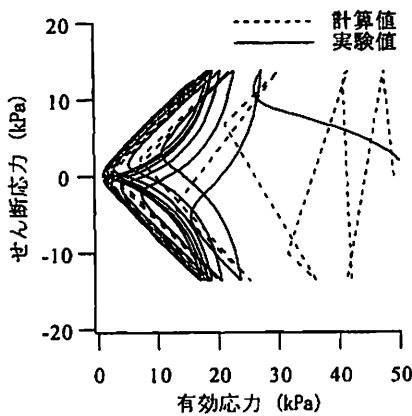


Fig.14 s137の有効応力経路の計算値と実験値の比較

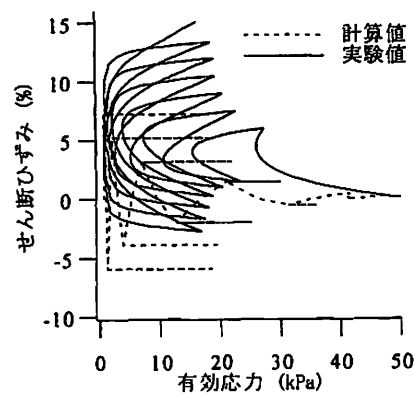


Fig.15 s137のせん断ひずみ-有効応力関係の計算値と実験値の比較

これも同様に、 $x$ は有効応力回復比、 $y$ は有効応力低下比である。

### 3) 有効応力回復量と流動量の関係

本研究では、有効応力が急変するひずみ（有効応力急変ひずみ）の移動量（ $n$ 回目と $n-1$ 回目の差）を流動量と定義している。既にFig.8に示したように、有効応力急変ひずみと有効応力回復量に相関があることがわかっている。そこで、流動量の増分に有効応力の回復量と与える影響を調べた。Fig.13に流動量の増分（ $n$ 回目の流動量と $n-1$ 回目の流動量の差）と有効応力回復量のグラフを示す。近似式は以下の式となった。

$$y = 0.118x \quad R = 0.48 \quad \dots (4)$$

$x$ が有効応力回復量、 $y$ が有効応力急変ひずみの移動量の増分である。

実験から求めた上記の近似式を、流動量を計算するプログラムに導入した。なお、プログラムは、応力履歴の山と谷部分のピーク値を読み取り並べたデータを入力し、有効応力と流動量を入力する簡易的なものとなっている。これにより、入力として応力履歴を用い、出力として流動量を計算している。また、ランダム波も計算可能なものとした。

## 7. 実験結果と計算結果の比較

Fig.14にs137の実験と計算の有効応力経路を示す。実験で

は載荷1波目で大きく有効応力が低下している点が計算結果と異なっている。計算では有効応力の低下はせん断応力に応じた値になっており、その値は近似式で平均的なものとして求めているため差異が発生したと考えられる。Fig.15にs137の実験と計算のせん断ひずみと有効応力関係を示す。傾向的には有効応力急変ひずみがひずみのプラス側とマイナス側を交互に行き来する挙動が表現できている。しかし、定量的に再現できているわけではない。

Fig.16にrPIの実験と計算の有効応力経路を示す。ランダム波であるが、計算した有効応力経路は、実験の軌跡を良く再現できている。Fig.17にrPIの実験と計算のせん断ひずみと有効応力関係を示す。計算では過剰間隙水圧比が1.0に達しても応力履歴があった場合流動量が増加していることが表現できているが、実験結果とは差が生じた。

Fig.18に本研究で行った実験と計算のそれぞれの流動量の比較を示す。グラフの直線上が1対1の関係となっている。このグラフをみると、規則波は概ね一致しているといえるが、ランダム波とひずみ制御試験が計算と実験で大きく異なっている。

Fig.19に過剰間隙水圧比0.9に達したときの繰返し回数の実験と計算した結果との比較を示す。なお、各波形は一つの山を1サイクルと考えているため、液状化強度曲線に対応した波の数え方の場合、このグラフのサイクルの値の1/2の値が1

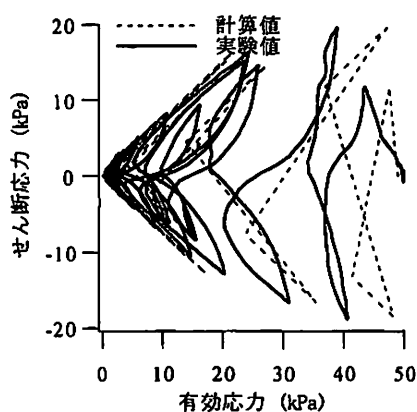


Fig.16 rPIの有効応力経路の計算値と実験値の比較

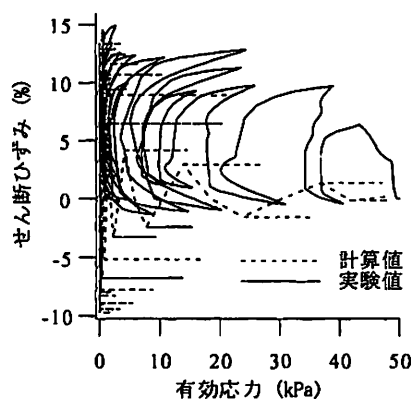


Fig.17 rPIのせん断ひずみ-有効応力関係の計算値と実験値の比較

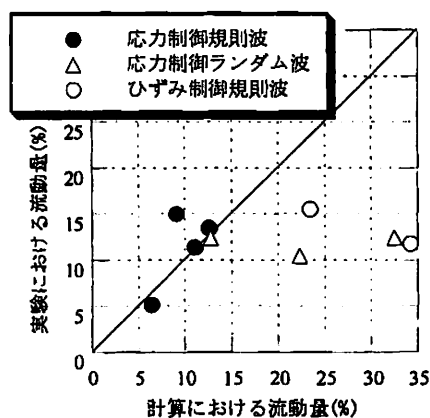


Fig.18 流動量の実験と計算の比較

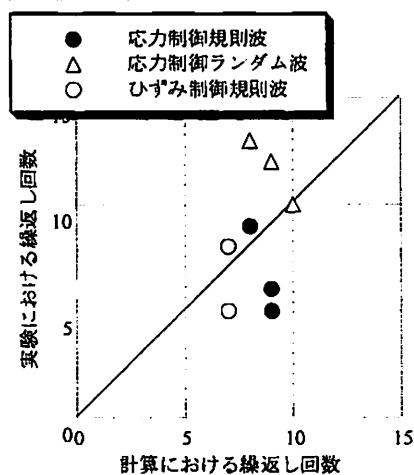


Fig.19 過剰間隙水圧比 0.9に達したときの実験と計算における繰返し回数

サイクルとなる。このグラフでは3回程度の違いで、実質的には1.5回程度の違いである。過剰間隙水圧比が0.9に達する繰返し回数については、計算値が実験と概ね一致しているといえる。

本研究では主として規則波のデータを用いて実験結果を整理し、その近似式を用いて流動量を計算した。そのため、計算値がある程度規則波の実験と合うことは予想できるとあり、実際概ねこれらは一致していた。しかし、ランダム波とひずみ制御規則波の関しては、流動量の実験値と計算値では、差異が大きく発生した。ランダム波の流動量を、流動のメカニズムに矛盾なく予測できるような流動過程を考察する必要がある。

## 8. まとめ

著者らが行った実験結果から、繰返しせん断応力履歴と有効応力低下量や流動量の関係を有効応力経路と関連付けながら求めた。次にこれらの結果を元に、流動のメカニズムを想定し、流動量を計算するプログラムを作成した。作成したプログラムで計算した流動量や過剰間隙水圧比を実験結果と比較した。その結果、応力制御規則波載荷実験については実験結果と概ね一致した結果が得られたが、応力制御ランダム波載荷実験やひずみ制御規則波実験では流動量に大きな差異が

見られた。想定した流動のメカニズムはある程度実際の挙動を反映できていると思われるが、ランダム波やひずみ制御規則波実験については、想定したメカニズムで説明できるか、近似式の出し方は適切か等を含めて、検討する必要がある。

なお、本研究で用いた計算プログラムは、

- 1) 繰返しせん断応力履歴から出力として流動量が計算できる
  - 2) ランダム波の流動量が計算できる
  - 3) 過剰間隙水圧比が1.0に達した後も履歴が載荷された場合に流動量が増加する
- といった特徴を有している。

## 参考文献

- 1) 山口晶・飛田善雄・風間基樹：非排水繰返しせん断履歴後に間隙水の流入を受ける土のせん断変形特性，土木学会論文集，No.778/Ⅲ-69，pp.139-150，2004。
- 2) 日下部伸・森尾敏・岡林巧・藤井照久・兵動正幸：簡易単純せん断試験装置の試作と種々の液状化試験への適用，土木学会論文集，No.617/Ⅲ-46，pp.19-304，1999。